

해저터널의 이완하중고 산정을 위한 제안식들과의 수치해석적 비교 연구

유광호¹, 이동훈^{2*}

A numerical comparison study on the estimation of relaxed rock mass height around subsea tunnels with the existing suggested methods

Kwang-Ho You, Dong-Hoon Lee

Abstract When constructing subsea underground structures, the influence of high water and seepage pressure acting on the structures can not be neglected. Thus hydro-mechanical coupled analysis should be performed to estimate the behavior of the structures precisely. In practice, relaxed rock load is generally used for the design of tunnel concrete lining. A method based on the distribution of local safety factor around a tunnel was proposed for the estimation of a height of relaxed rock mass ($H_{relaxed}$). In this study, the validation of the suggested method is investigated in the framework of hydro-mechanical coupled analyses. It was suggested that inducing inflow by pumping through a drainage well gave more reliable results than inducing inflow with shotcrete hydraulic characteristics in case of rock condition of Class III. In this study, therefore, inducing inflow by pumping through a drainage well are adopted in estimating $H_{relaxed}$ due to a tunnel excavation with the rock condition of Class I, III, and V. Also the estimated $H_{relaxed}$ results are compared with those of the existing suggested methods. As the result of this study, it is confirmed that estimating $H_{relaxed}$ based on the distribution of local safety factor around a tunnel can be effectively used even for the case of hydro-mechanical coupled analysis. It is also found that inducing inflow pumping through a drainage well gives more precise and consistent $H_{relaxed}$ of a subsea structure.

Keywords: Height of relaxed rock mass, hydro-mechanical coupled analysis, subsea underground structures, local factor of safety

요지 해저 지하 구조물을 시공할 경우는 높은 수압 및 침투압 등의 영향이 무시될 수 없으므로 지하 구조물의 정확한 거동평가를 위해서는 수리-역학적 연계해석이 수행되어야만 한다. 또한, 실무에서는 암반이완하중을 고려하여 터널의 콘크리트 라이닝을 설계하며, 이를 위해 이완하중고($H_{relaxed}$)를 터널 주변의 국부안전율 분포를 이용하여 수치해석에 의해 산정하는 방법이 제안된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석 시 국부안전율을 이용한 이완하중고 산정 기법의 타당성을 살펴보았다. 3 등급 암반을 대상으로 쏏크리트 수리특성을 이용한 유도 배수방법과 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 방법을 비교한 결과 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수방법이 보다 신뢰할 수 있는 결과를 준다고 발표된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 집수정의 펌핑을 이용한 유도 배수방법을 이용하여 1, 3, 5 등급 암반을 대상으로 이완하중고를 산정하여 제안식들과 적용성을 비교하였다. 연구 결과 연계해석 시 해저 시설물의 이완하중고를 정확하게 산정하기 위해서는 기존에 제시된 이론식 보다는 집수정의 펌핑을 이용하여 유도 배수하는 모델링 방법이 보다 정확하고 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

주요어: 이완하중고, 수리-역학적 연계해석, 해저 지하 구조물, 국부안전율

1. 서론

해저 지하 구조물을 시공할 경우는 높은 수압 및 침투압 등의 영향이 무시될 수 없다. 지하수위 아래에서 터널을 굴착하면 터널 주변 지반의 하중 지지력이 감소하여 암반의 체적이 변하여 지반변형이 증가한다. 따라서

이러한 경우 지하 시설물의 정확한 거동평가를 위해서는 수리(hydraulic) - 역학적(mechanical) 연계해석이 수행되어야 한다. 유충식과 김선빈(2006)에 의하면 현재 실무에서 적용하고 있는 각종 터널해석 프로그램은 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링 시 지반공학적인 문제를 반영하는데 있어서의 각종 해석 모델링에 대한 경험부족으로 응력-간극수압 연계해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 많지 않은 실정이다.

암반이완하중을 산정하는 방법으로는 Terzaghi의 암

¹정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

²학생회원, 수원대학교 토목공학과 대학원생

*교신저자: 유광호 (khyou@suwon.ac.kr)

반하중 분류표, Terzaghi 및 Bierbäumer의 이론식, RMR 값 및 Q 값을 이용한 경험식, 그리고 터널 주변의 국부 안전을 분포를 이용한 방법이 있다. 유광호 등(2000)에 따르면 국부안전율을 이용한 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는데 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴영역이나 양상, 보강이 필요한 부분을 찾아내는데 효과적으로 사용될 수 있다. 따라서 터널 굴착 후의 이완 영역은 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 그 크기를 찾을 수 있다고 하였다(유광호 2005).

본 연구에서는 국부안전율을 이용한 이완하중고 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위해 가상의 해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석을 수행하였다. 이에 앞서 유광호와 이동훈(2007)에 의하여 3 등급 암반을 대상으로 슛크리트 수리특성을 이용한 유도 배수 방법과 집수정 펌핑량을 이용한 유도 배수 방법으로 이완하중고를 산정하고 그 결과를 비교하여 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 방법이 신뢰성이 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 발표한 바 있다. 따라서 본 연구는 집수정의 펌핑을 이용한 유도 배수 방법을 이용하여 3 등급 암반에만 국한되어 있던 것을 1, 3, 5 등급으로 대상암반을 확대하여 이완하중고를 산정하고 기존에 제안된 식들과 비교하였다. 또한 슛크리트 두께 3 가지(30, 45, 60 cm)와 집수정 펌핑량을 3 가지로 달리하여 민감도 분석을 실시하였다.

2. 국부안전율에 의한 이완하중고 산정 방법

수치해석에 있어, 각 요소에서의 응력상태는 전응력 표현 시 그림 1과 같이 점선으로 표시된 Mohr 원(주응력 σ_1 과 σ_3)에 의해 표현될 수 있고, 공극수압(P_w)이 작용하면 유효응력에 의한 응력상태는 $\sigma - \tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 (a)로 그려진다. 이 원이 파괴면 (failure envelope)에 접하게 될 때 파괴가 발생한다. 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원 (b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 또한, 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (c)와 같이 파괴면에 접할

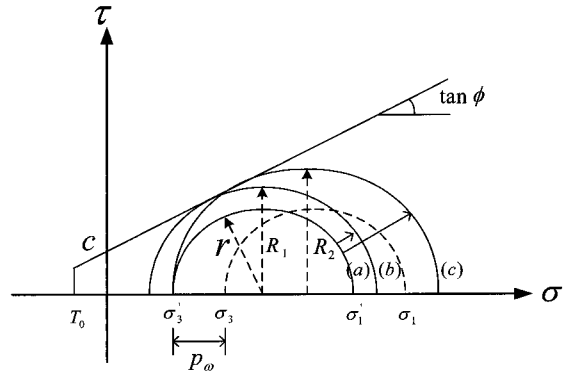


그림 1. 간극수압을 고려한 국부안전율

때까지 응력원의 반지름을 증가시킴으로서 파괴에 도달할 수도 있다. 두 원의 반지름 비($F = R_2/r$ or R_1/r)는 주어진 응력 상태에서 일종의 강도/응력비(strength/stress ratio)에 해당하며, 종종 국부 안전율(factor of safety)이라고도 한다. 특히, 본 연구에서는 σ_3 는 그대로 유지하면서 σ_1 이 증가하여 파괴되는 경우로 가정하여 안전율을 구하였다. 파괴될 때의 최대주응력을 σ'_{1f} 라 하면, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma'_{1f} = \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \sigma'_3 - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (1)$$

여기서, c 는 점착력이고, ϕ 는 내부마찰각이다.

이 때, 국부 안전율(F.S.)은 식 (2)와 같이 계산될 수 있다.

$$F.S. = \frac{R_2}{r} = \frac{\sigma'_3 - \sigma'_{1f}}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (2)$$

이와 같은 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는 데에는 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴영역이나 양상, 보강이 필요한 부분을 찾아내는데 효과적으로 사용될 수 있다(유광호 등, 2000). 따라서 터널 굴착 후의 이완 영역은 그림 2와 같이 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 그 크기를 찾을 수 있다(유광호, 2005).

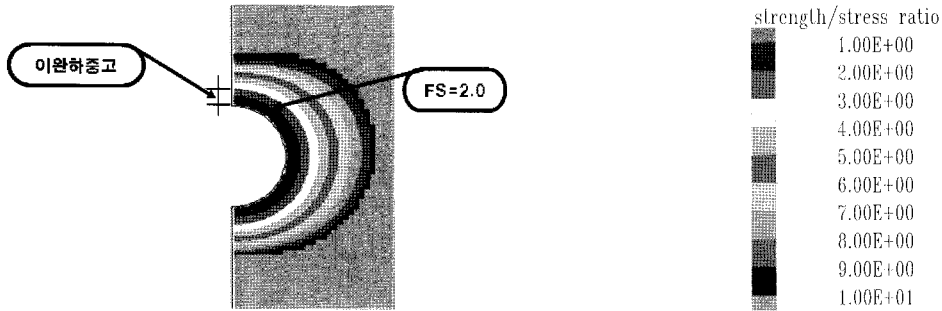


그림 2. 국부안전율 2.0에 의한 이완하중

3. 제안식을 이용한 이완하중 산정방법

대표적인 암반 이완하중 산정방법에는 Terzaghi 및 Bierbäumer의 이론식, RMR 값 및 Q 값을 이용한 경험식, 그리고 수치해석에 의한 방법 등이 알려져 있다. Terzaghi 암반하중 분류표, RMR 값 및 Q 값에 의한 산정방법들은 암반내의 터널에서 굴착에 의한 이완하중을 경험적으로 산정하는 방법인데 비해 Terzaghi 및 Bierbäumer의 이론식에 의한 방법은 지반을 연속체로 가정하고 한계평형이론에 근거하여 유도된 제안식이다. 수치해석에 의한 방법은 FEM 또는 FDM에 의한 터널 안정 해석 시 슛크리트 배면 토압 또는 소성영역 부분을 암반하중으로 고려하여 설계에 적용하고 있다.

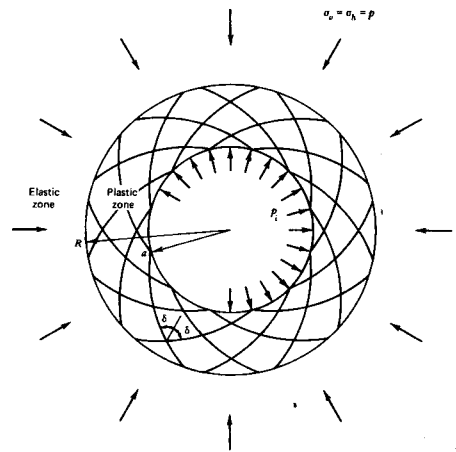


그림 3. Bray's 탄소성해석을 위한 가정 조건

3.1 소성영역의 산정을 위한 Bray의 이론적 모델

Bray(1967)는 터널 굴착으로 인해 굴착면 주변에 상당한 응력이 발생하여 주변 암반이 Mohr-Coulomb 이론에 의해 파괴가 초래된다고 가정하고, 파괴범위, 즉 소성영역(plastic zone)의 분석을 위해 초기응력이 등방인 상태($K_0=1$)로 가정하였다. 또한 반경 R까지 영향을 미치는 소성영역 내에서 균열(fractures)은 Mohr-Coulomb 이론에 근거하여 그림 3과 같이 방사선 방향과 δ 각도만큼 기울어진 로그나선형으로 발달한다고 가정하였다. 이것은 균열이 벽체나 바닥과 나란하게 발달하여 판형(slab)의 “ring cracks”을 형성하는 많은 암반의 경우에는 적당하지 않다. 그러나 세일이나 점토에서는 Bray의 로그나선형 가정이 타당하다고 여겨진다. 최소 강도의 경우 δ 의 적절한 값은 $45 + \phi/2$ 이나 이 값은 해의 독립적인 변수로서 남겨질 것이다. 다음 식 (3)과 같이 주어지는

Q 값을 정의하는 것이 유용하다.

$$Q = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi_j)} - 1 \quad (3)$$

소성영역내의 파쇄된 암반이 $\tau_p = s_j + \sigma \tan \phi_j$ 와 같은 전단강도 특성을 갖는 로그 나선형면을 포함한다고 가정하면, 탄소성 영역의 경계 반경 R은 다음 식 (4)와 같이 주어진다.

$$R = a \left(\frac{2p - q_u + [1 + \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})] S_j \cot \phi_j}{[1 + \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})] (p_i + S_j \cot \phi_j)} \right)^{\frac{1}{Q}} \quad (4)$$

여기서, p는 초기 암반응력($\sigma_v = \sigma_h = p$, MPa), q_u 는 신

선암의 일축압축강도(MPa), p_i 는 지보재가 지지하는 터널 내부압력(MPa), ϕ 는 선선암의 내부마찰각, S_j 는 절리면의 점착력, ϕ_j 는 절리면의 내부마찰각이다.

3.2 Terzaghi의 이론식

Terzaghi(1946)는 비 점착성의 건조한 조립토에 대해서 그림 4에서 보는 바와 같은 형태의 파괴면을 가정하고, 터널 굴착 시 라이닝에 작용하는 암반하중을 구했다. 얕은 터널에 대하여 연직암반하중 P_{roof} 은 식 (5)와 같이 제안되었다.

$$P_{roof} = \frac{\gamma B}{2K \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{K \tan \phi \cdot 2H}{B}}\right) \quad (5)$$

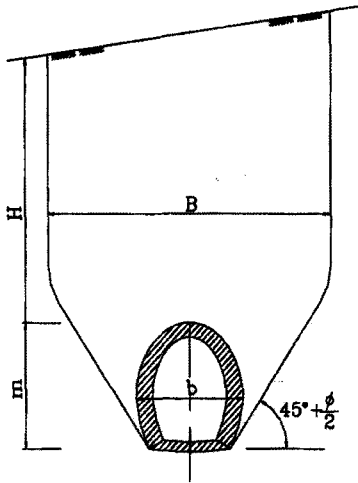
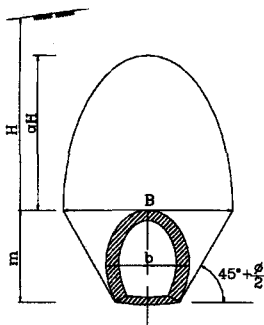


그림 4. Terzaghi's 암반하중 이론의 가정



(a) 이완영역

$$\text{여기서, } B = 2 \left[\frac{b}{2} + m \cdot \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right], \quad (6)$$

P_{roof} : 연직암반하중(t/m^2), γ : 지반 단위중량(t/m^3),
 K : 토압계수, ϕ : 지반 내부마찰각, b : 터널 폭(m),
 m : 터널 높이(m), H : 토피(m), B : 지반이완범위(m)

또한, 깊은 터널에 대하여 연직암반하중 P_{roof} 는 식 (7)과 같이 제안되었다.

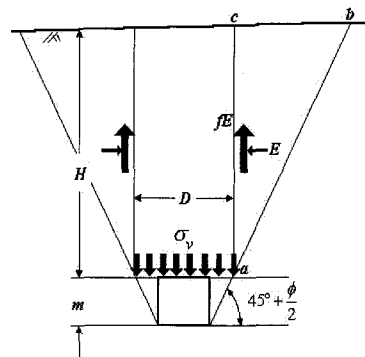
$$P_{roof} = \frac{\gamma B}{2K \tan \phi} \quad (\text{일정}) \quad (7)$$

3.3 Bierbäumer의 이론식

Bierbäumer(1913)는 그림 5의 (a)와 같이 굴착 시 암반의 이완영역이 포물선 형태로 발생하는 것으로 가정하였다(박시현, 2003). Bierbäumer의 터널 토압은 터널 하부에서 $45 + \phi/2$ 의 경사면을 따라 상부의 이완영역(단위중량 γ)이 연직 하중으로 작용한다. 이완고는 $h = \alpha H$ (α 는 감소계수)로서 토피고에 비례하며 감소계수를 산정하기 위해서는 그림 5의 (b)와 같은 지반 모델을 고려하여 토피 abc 가 미끄러질 때의 평형조건을 고려하여 터널 토압을 산정하였다. 터널 천단부에서의 연직 토압은 식 (8)과 같다.

$$P_{roof} = \alpha H \gamma \quad (8)$$

여기서, P_{roof} : 연직이완하중(t/m^2), ϕ : 지반 내부마찰각,
 b : 터널 폭(m), m : 터널 높이(m), H : 토피(m), B : 지반



(b) 토압 모형도

그림 5. Bierbäumer의 터널 토압

이완범위(m).

- 토피가 작은 경우:

$$\alpha = 1 \tag{9}$$

- 토피 $H \leq 5B$ 인 경우:

$$\alpha = 1 - \frac{\tan\phi \cdot \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \cdot H}{b + 2m \cdot \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)} \tag{10}$$

- 토피 $H > 5B$ 인 경우:

$$\alpha = \tan^4\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \tag{11}$$

4. 연계해석 모델링

4.1 해석 개요

본 연구에서는 수리·역학적 연계해석 시 국부안전율을 이용한 이완하중과 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위해 슛크리트 수리특성을 이용한 유도 배수방법과 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 방법을 이용하여 해석을 수행하고 결과를 비교하였다.

대상 터널은 그림 6과 같이 직경 10 m의 원형터널이며, 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였다. 터널 굴착 시 미칠 수 있는 영향을 고려하여 해석영역을 높이 140 m, 터널 중심으로부터 외부경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50 m로 하였다. 해석속도를 높이기 위하여 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반 단면 해석을 수행하였으며, 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링하였다. 즉, 지하수면은 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 지표면에 작용하는 수압만을 상재하중으로 처리하였다. 해석 요소망은 그림 6의 (a), (b)와 같이 방사형과 격자형을 사용하였으며, 터널 굴착면으로부터 외부로 멀어질수록 요소가 커지도록 구성하였다. 경계조건은 좌·우 측면경계는 수평방향 변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하였으며, 우 측면경계와 상부경계에서의 수압은 일정하게 유지되도록 하였다. 또한, 굴착은 전단면굴착으로 가정하였다.

일반적으로 2차원 해석에서는 3차원적 터널 시공과정을 현실적으로 모델링하기 위해 하중분배 개념을 도입하여 해석을 수행하는데 유충식(2006)에 의해 수행된 연구에 의하면, 시공과정을 모델링 할 때 각 굴착단계를 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 굴착단계 2일, 연성 슛크리트 단계 8일, 경성 슛크리트 단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하여 본 연구에서는 3가지 굴착

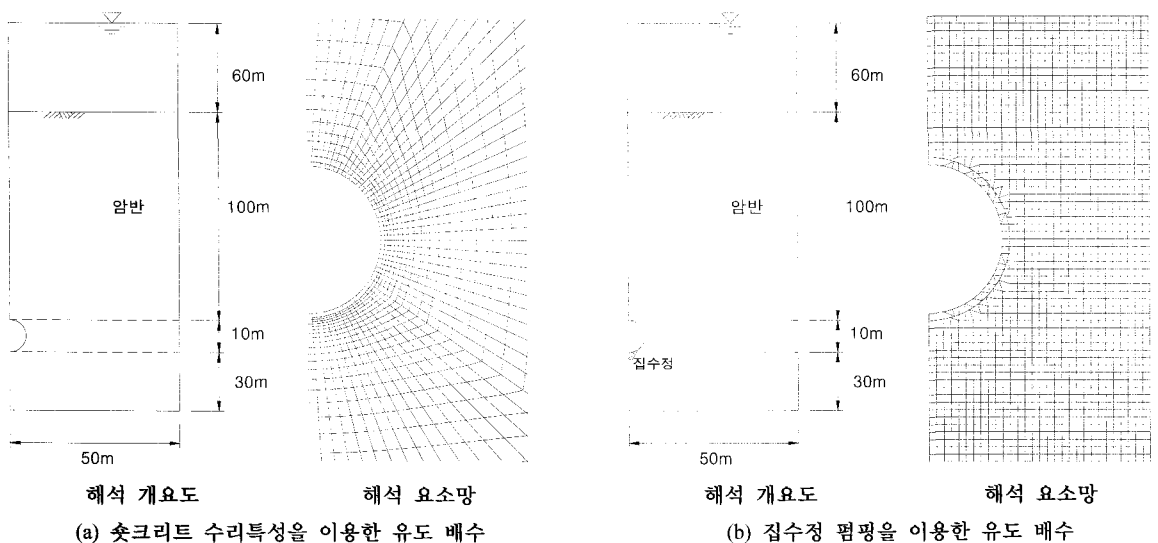


그림 6. 유도 배수 모델링 방법 비교

단계(터널굴착 - 연성 슛크리트 타설 - 경성 슛크리트 타설)별 하중 분담율을 60% - 20% - 20%로 가정하여 해석하였다.

연계해석 시 슛크리트 수리특성을 이용한 유도 배수 방법은 그림 7과 같이 슛크리트의 수리특성을 반영하기 위해 역학적 특성을 보요소로 하고 수리적 특성은 연속체요소로 동일한 두께에 해당하는 요소 크기를 설정하여 반영하였다(Shin 등 2002; 2005). 또한 터널 시공 시 굴착면을 통해 해수가 유출되므로 굴착면에서의 간극수압을 영(zero)으로 함으로써 배수터널에 대한 조건을 부여할 수 있다. 그리고 역학적 계산을 수행할 때에는 물의 체적 탄성계수를 영(zero)으로 하여 역학적인 움직임에 의해 발생하는 과잉간극수압을 막고자 하였으며, 또한 수리계산을 수행할 때에는 슛크리트의 투수계수(cm/sec)를 가장

적은 경우($\times 10^{-11}$)와 가장 큰 경우($\times 10^{-5}$) 사이를 100배씩 증가시켜 5 가지의 수리특성에 대해 해석을 수행하였다.

집수정의 펌핑을 이용한 유도 배수 방법에서는 그림 6의 (b)와 같이 굴착면으로 유입되는 해수를 집수정으로 유입시킬 수 있도록 터널 인버트 하단에 집수정을 설치하여 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 슛크리트 수리특성을 이용한 유도 배수 방법은 이완하중고 산정에 있어 결과 값이 부정확하고 일관성이 없었는데 비해 집수정의 펌핑을 이용한 유도 배수 방법은 일관성 있는 신뢰할 만한 결과를 얻은 바 있다(유광호 등, 2007). 따라서 본 연구에서는 집수정의 펌핑을 이용한 유도 배수 방법을 사용하여 굴착면 주변의 국부안전율 등고선도를 구하여 이완하중고를 산정하였다.

4.2 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 모델링

집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 방법은 1, 3, 5 등급 암반을 대상으로 슛크리트 두께는 30 cm, 45 cm, 60 cm(3가지), 슛크리트 수리특성은 1.0×10^{-5} cm/sec, 간극률은 0.08로 고정하였고, 집수정의 펌핑량은 3.6, 1.8, 0.036 m³/hr-m(3가지, a, b, c)을 적용하였다. 측압계수(K₀)는 1.0을 사용하여, 총 3×3×3=27 가지 경우에 대해 연계해석을 실시하고 이완하중고를 산정하였다. 또한, 2차원 연계해석을 위해 탄소성 거동 모사가 가능한 라이너(liner)요소를 사용할 수 있는 FLAC-2D ver 5.0(Itasca

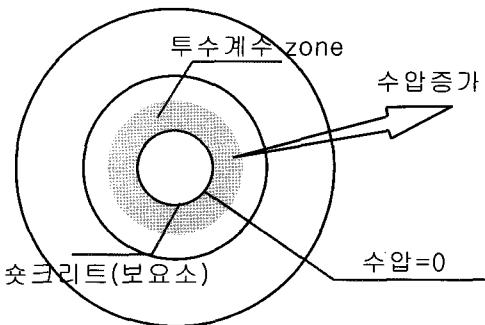


그림 7. 슛크리트 지보재 모델링

표 1. 수정된 암반등급별 변형성 및 강도 정수

구 분	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	투수계수 (cm/sec)	간극률
1 등급	22.75	13.65	45	1.0	26	1.22×10^{-5}	0.20
3 등급	8.67	5.20	38.5	0.25	23	7.22×10^{-5}	0.25
5 등급	1.87	1.12	31	0.05	21	4.22×10^{-4}	0.30

표 2. 슛크리트(Liner 요소) 역학 및 수리 물성치

두께 (m)	포아송비	탄성계수 (GPa)	허용 인장응력 (MPa)	잔류 인장응력 (MPa)	허용 압축응력 (MPa)	투수계수 (cm/sec)	간극률
0.30	0.25	3.0	0.89	0.45	12.36	1.0×10^{-5}	0.08
0.45							
0.60							

Consulting Group Inc., 2005)을 사용하였다.

표 1은 한국도로공사 도로교통 기술원(2002), “암반 등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구”에서 사용된 암반등급별 변형성 및 강도 정수를 바탕으로 암반상태에 맞는 물성치를 가정하여 사용하였다. 표 2는 숏크리트를 모델링하기 위해 사용된 Liner 요소의 역학 및 수리 물성치를 나타낸 것이다.

5. 수치해석 결과

각각의 암반등급별로 집수정 펌핑량($3.6 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}$)이 가장 많고 숏크리트 두께가 45 cm인 경우 터널주변의 국부 안전율 등고선도는 그림 8과 같고 이완하중고($H_{relaxed}$)는 그림과 같이 국부안전율이 2.0에 해당하는 높이를 구하여 산정하였다. 암반등급이 1, 3, 5 등급으로 불량해질수록 이완하중고가 0.57 m, 3.32 m, 11.20 m로 증가하는 것을 알 수 있다.

암반등급별로 숏크리트 두께가 이완하중고에 미치는 영향을 초기 집수정 펌핑량으로 구분하고 천단부와 측벽부로 나누어 그림 9와 같이 그래프로 나타내었다. 그림 9의 (a)와 같이 1 등급 암반에서는 숏크리트 두께가 증가할수록 이완하중고는 감소하나 그 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 천단부와 측벽부의 이완하중고는 약 30 cm 정도 차이를 보이며, 초기 집수정 펌핑량이 이완하중고에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 9의 (b)와 같이 3 등급 암반의 경우 숏크리트

두께가 증가할수록 이완하중고는 감소하나 그 차이는 30~60 cm 사이 정도로 나타났다. 천단부와 측벽부의 차이는 약 1 m 정도의 차이를 보이며, 초기 집수정 펌핑량이 이완하중고에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 9의 (c)와 같이 5 등급 암반에서는 1, 3 등급 암반에서와 같이 숏크리트 두께가 증가할수록 이완하중고가 감소하였으며, 측벽부에서 초기 집수정 펌핑량에 의해 약 50~60 cm 정도 차이가 나타났다. 숏크리트 두께가 30 cm일 때 이완하중고를 산정할 수 없었는데, 이는 암반등급이 불량하여 지보재가 파괴되었기 때문이다.

암반등급에 따라서 초기 집수정 펌핑량과 이완하중고의 관계를 숏크리트 두께별로 정리하여 그림 10과 같이 그래프로 나타냈다. 그림 10의 (a)와 같이 1 등급 암반에서는 초기 집수정 펌핑량이 $a(3.6 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m})$ 에서 $c(0.036 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m})$ 로 감소하는 경우는 이완하중고에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 숏크리트 두께가 증가하여도 이완하중고에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

그림 10의 (b)와 같이 3 등급 암반의 경우 1 등급의 암반상태와 마찬가지로 초기 집수정 펌핑량이 $a(3.6 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m})$ 에서 $c(0.036 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m})$ 로 감소하는 경우 이완하중고의 차이가 약 10 cm 정도로서 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 숏크리트 두께가 30 cm일 때 이완하중고가 가장 높게 나타났으며, 숏크리트 두께가 증가할수록 천단부와 측벽부의 이완하중고는 전반적으로 감소

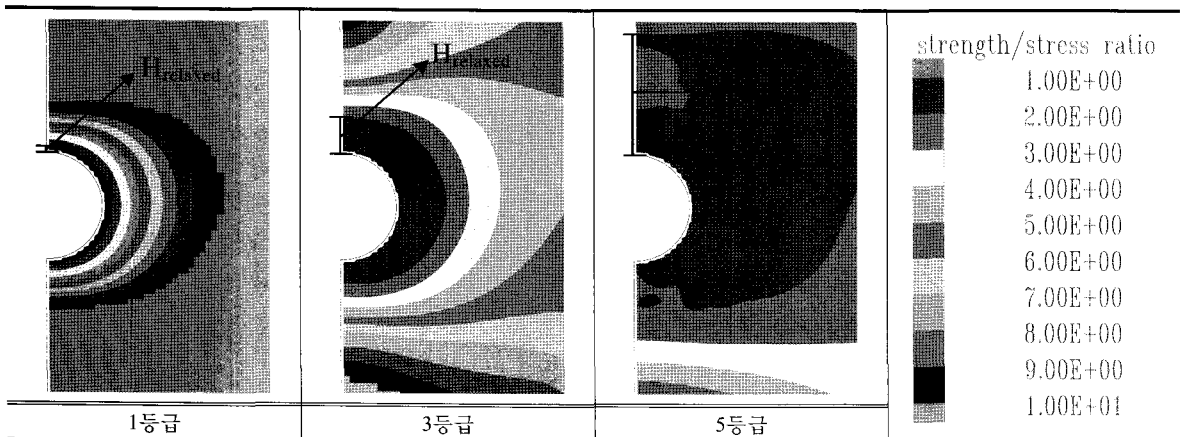
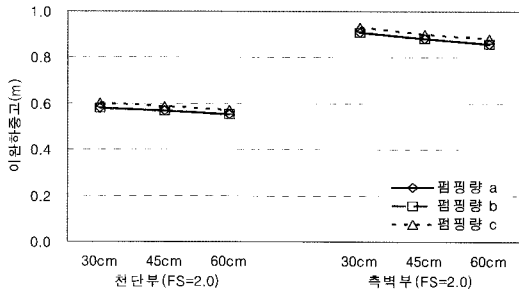
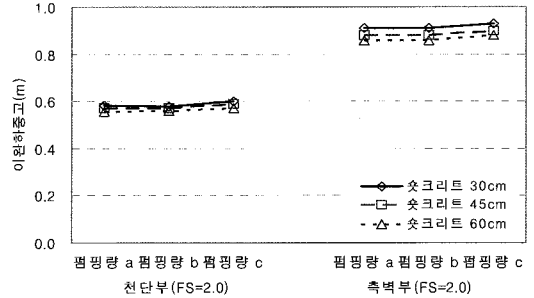


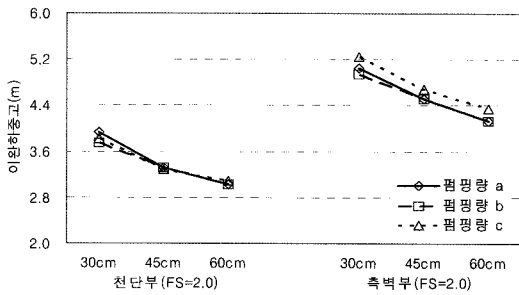
그림 8. 터널주변의 국부안전율 등고선도



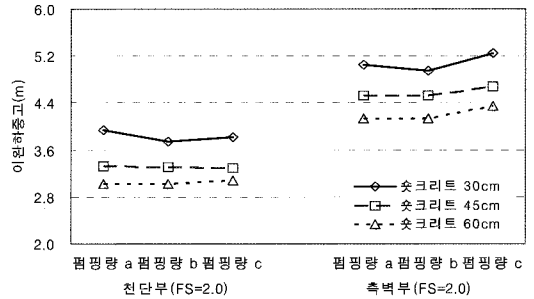
(a) 1등급



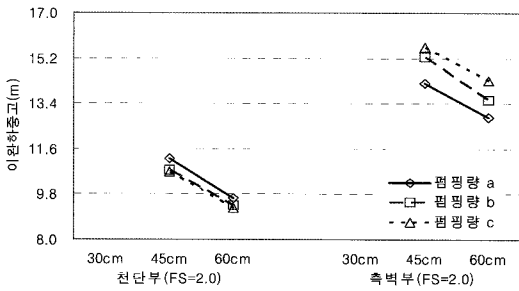
(a) 1등급



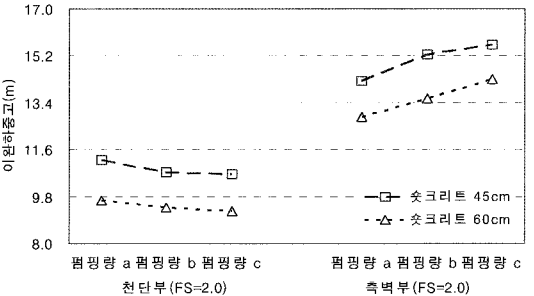
(b) 3등급



(b) 3등급



(c) 5등급



(c) 5등급

그림 9. 숏크리트 두께 vs 천단부 및 측벽부의 이완하중고

그림 10. 집수정 펌핑량 vs 천단부 및 측벽부의 이완하중고

하는 것으로 나타났다.

그림 10의 (c)와 같이 5 등급 암반의 경우 초기 집수정 펌핑량이 a(3.6 m³/hr-m)에서 c(0.036 m³/hr-m)로 감소하는 경우 천단부에서 이완하중고의 차이는 1.0 m 이하로 1, 3 등급 암반에 비해 약간의 차이가 있었으며, 측벽부에서는 차이가 1.5 m 정도 나타났다. 일반적으로 펌핑량이 많을수록 터널 주변부의 간극수압이 작아져서 측벽부의 경우와 같이 이완하중고는 줄어들게 된다. 하지만 천단부의 경우는 펌핑량이 많을수록 오히려 이완하중고가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 실제 충유입량

중에 숏크리트를 통해 유입되는 양이 오히려 펌핑량 c의 경우가 a 및 b의 경우보다 커서 숏크리트 배면의 간극수압이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

암반등급과 이완하중고와의 관계를 숏크리트 두께가 45 cm인 경우에서 초기 집수정 펌핑량으로 구분하여 그림 11과 같이 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 암반등급이 불량해지는 5 등급에서 이완하중고가 가장 크게 나타났으며, 천단부에 비해 측벽부의 이완하중고가 더 큰 것으로 나타났다. 초기 집수정 펌핑량의 변화가 이완하중고에 미치는 영향은 거의 없는 것으로

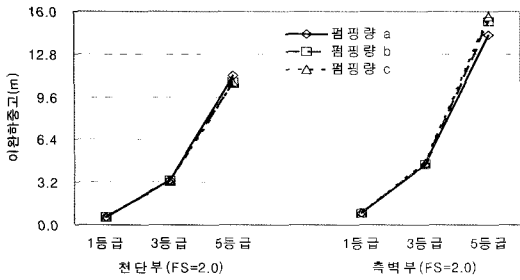


그림 11. 암반등급 vs 천단부 및 측벽부의 이완하중고(숫크리트 두께 45 cm)

표 3. 암반등급별 평균 이완하중고

암반 등급	이완하중고(천단부, F.S=2.0)
1	0.58 m
3	3.40 m
5	10.15 m

나타났다.

국부안전율이 2.0일 때 각각의 암반등급에 따른 천단부의 이완하중고를 평균값으로 나타내어 표 3과 같이 정리하였다. 숫크리트 두께와 집수정 펌핑에 의한 이완하중고의 차이가 거의 없는 것으로 나타나 이론식과의 비교를 위해 평균값을 사용하였다.

6. 제안식들에 의한 이완하중고 산정

대표적인 암반 이완하중 산정방법은 한계평형법에 기초한 이론적 방법, 경험에 의한 방법, 수치해석에 의한 방법이 있는데 본 연구에서 제안한 이완하중고 산정방법이 타당한가를 살펴보기 위해 Bray의 소성영역 산정방법, Terzaghi 및 Bierbäumer의 이론식에 의한 이완하중고 산정방법과 비교하였다.

표 4. Bray의 소성영역

암반등급	내부 마찰각 (deg)	초기응력 (MPa)	일축 압축강도 (MPa)	점착력 (MPa)	절리면 마찰각 (deg)	지보압 (MPa)	반경 (m)	소성영역 (m)
1	45	4.34	2.94	1.00	35	0.96	5	0.00
3	38.5	4.03	1.96	0.25	29	0.86	5	0.54
5	31	3.82	0.98	0.05	25	0.80	5	2.72

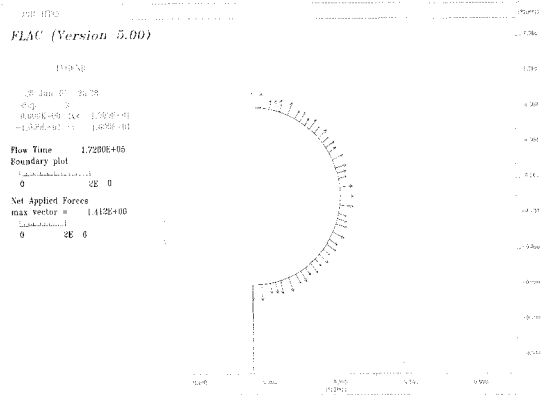


그림 12. 평균 지보압의 산정(1등급, 숫크리트 두께 30 cm, 집수정 펌핑량 a)

Bray의 소성영역 산정 방법에서는 표 4와 같은 입력값을 사용하여 소성영역을 산정하였다. 계산과정에서 초기응력은 터널이 위치하는 심도의 토압과 수압을 더하여 구했고, 숫크리트가 부담하는 지보압은 그림 12와 같이 터널을 굴착하면 굴착력이 발생하는데 1 등급 암반의 경우 숫크리트 두께를 30 cm로 했을 때 발생하는 굴착상당력은 1.4 MN이다. 이 중 숫크리트가 지탱해야 하는 힘은 하중분담율 40%(연성+경성 숫크리트)를 적용하여 계산했고 지보압은 힘이 작용하는 면적으로 나누어 구했다.

Terzaghi의 이론식은 비점착성의 건조한 조립토에서 사용하는 방법으로서 표 5와 같은 입력값을 사용하여 이완하중 및 이완하중고를 산정하였다. 이 때 사용된 입력값들은 수치해석 시 사용된 물성치와 터널제원은 동일하게 사용되었다.

Bierbäumer의 이론식에서는 표 6과 같은 입력값을 사용하여 이완하중 및 이완고를 산정하였다. Bierbäumer의 이론식에서 이완하중고는 주로 토피에 의존하며 따

표 5. Terzaghi의 이론식

암반등급	내부마찰각	단위중량 (kN/m ³)	토피 (m)	터널폭 (m)	터널높이 (m)	이완하중 (kN)	이완고 (m)
1	45	26	105	10	10	237.7	9.14
3	38.5	23				284.0	12.35
5	31	21				372.5	17.74

표 6. Bierbäumer의 이론식

암반 등급	내부 마찰각	단위중량 (kN/m ³)	지반이완 범위(m)	토피 (m)	터널폭 (m)	터널높이 (m)	측압	이완하중 (kN)	이완고 (m)
1	45	26	18.28	105	10	10	1.0	80.4	3.09
3	38.5	23	19.65					130.7	5.68
5	31	21	21.32					115.9	5.52

라서 토피고에 비례한다는 가정 하에 토피에 따라 얇은 터널과 깊은 터널로 나누워 감소계수를 구하여 이완하중고를 산정한다. 다만, 측압계수는 수치해석 시와 동일하게 1.0으로 하였다.

7. 수치해석과 제안식들의 결과 비교

각각의 제안식들이 적용되는 조건과 입력 변수들 간에는 서로 차이가 있으나 여기서는 단순히 산정된 이완하중고만을 표 7과 그림 13과 같이 정리하고 비교하였다.

Bierbäumer의 이론식을 제외하면 본 연구에서 제안한 방법과 이론식 모두에 있어서 암반상태가 불량하면 이완하중고가 증가하는 것을 알 수 있다. Bray의 이론식은 다른 방법에 비해 이완하중고를 작게 산정하는 것을 알 수 있다. 특히, 1 등급 암반에서는 이완하중고가 “0”으로 나타났고, 암반등급간의 이완하중고의 차이도 크지 않은 것으로 나타났다. Terzaghi의 이론식은 이완하중고를 가장 크게 산정하는 것으로 나타났다. 한편 Bierbäumer의 이론식은 암반상태가 1, 3 등급까지는 이완하중고가 증가하다가 5 등급에서 감소하는 것으로 나타났는데, 이는

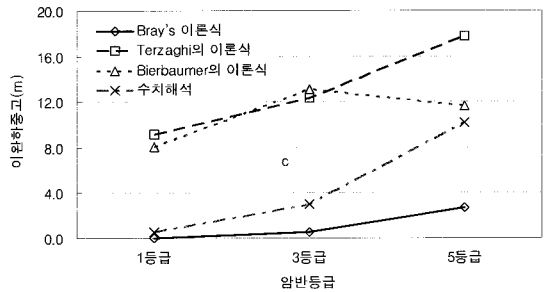


그림 13. 암반등급별 산정된 이완하중고 비교

내부마찰각이 지반이완범위에 영향을 끼쳐 1, 3 등급에서는 깊은 터널의 감소계수를 사용하게 되나 5 등급에서는 얇은 터널의 감소계수를 사용하여 이완하중 및 이완하중고가 감소한 것으로 사료된다. 국부안전율 2.0을 사용하여 이완하중고를 구한 본 연구 결과를 보면 1 등급 암반에서는 이완하중고가 약 0.6 m 정도이고 암반등급이 불량한 5 등급에서 약 10 m 정도로 증가함을 알 수 있다.

표 7. 산정된 이완하중고 비교(단위: m)

암반등급	Bray	Terzaghi	Bierbäumer	본 연구(F.S=2.0)
1	0	9.14	8.04	0.58
3	0.54	12.35	13.07	3.04
5	2.72	17.74	11.59	10.15

8. 결 론

해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석 시 국부 안전율을 이용한 이완하중고 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위해 기존의 3등급 암반을 대상으로 슛크리트 수리특성을 이용한 유도 배수방법과 집수정의 펌핑을 이용한 유도 배수방법을 이용하여 이완하중고를 산정했던 기존의 연구를 바탕으로 암반등급을 1, 3, 5 등급으로 확대하고 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 방법으로 국부안전율이 2.0인 영역에서의 이완하중고를 산정하여 제안식들과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

초기 집수정의 펌핑이 이완하중고에 미치는 영향은 암반등급에 따라 다소 차이는 있지만 그 차이가 1.0 m 내에서 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 슛크리트 두께가 이완하중고에 미치는 영향은 암반상태가 가장 좋은 1 등급 암반에서는 거의 없지만 암반상태가 불량한 5 등급 암반에서 약 2.0 m 내에서 영향을 미치는 것으로 나타났다. Bray의 이론식은 이완하중고를 너무 작게 산정하고, Terzaghi의 이론식은 크게 산정하며, Bierbäumer의 이론식은 암반의 등급상태를 적절히 반영하지 못하는 단점이 있는 것을 알 수 있었다. 반면에 수치해석에 의해 구한 이완하중고 결과는 이론식에 의해 구한 것보다 일관적이고 타당함을 알 수 있었다. 따라서, 해저터널의 이완하중고 산정 시에도 국부안전율(F.S=2.0)과 집수정 펌핑을 이용하여 유도 배수시키는 수치적 연계해석을 수행하는 방법이 타당할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10-01, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 박시현 (2003), "Terzaghi 터널토압의 재조명에 관한 연구", 터널기술, 제5권 제3호, pp. 261-268.
2. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), "연약암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가", 터널기술, 제2권 제3호, pp. 47-57.
3. 유광호 (2005), "2-ARCH 터널의 라이닝 설계를 위한 터널굴착주변 응력이완 영역산정에 관한 연구", 터널기술, 제7권 제4호, pp. 343-352.
4. 유광호, 이동훈 (2007), "연계해석 시 해저터널의 이완하중고 산정을 위한 수치 모델링 비교 연구", 한국암반공학회 특별 심포지엄 논문집, 제주 그랜드 호텔, pp. 137-146.
5. 유충식, 김선빈 (2006), "NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 189-198.
6. 한국도로공사 도로교통기술원 (2002), 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구, 268p.
7. Itasca Consulting Group, Inc. (1999), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 3.4, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
8. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
9. Bierbäumer, A. (1913), Die Dimensionierung des Tunnelmanerwerks, 101p.
10. Bray, J. W. (1967), A study of jointed and fractured rock, II. Theory of limiting equilibrium, Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology) 5: pp. 197-216.
11. Shin, J.H., D.M. Potts, L. Zdravkovic (2002), "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour", Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403
12. Shin, J.H., D.M. Potts, L. Zdravkovic (2005), "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil", Geotechnique, Vol. 42, pp. 1585-1597.



유 광 호

수원대학교
토목공학과
교수

E-mail: khyou@suwon.ac.kr



이 동 훈

수원대학교
토목공학과
대학원생

E-mail: dongury2@hanmail.net
